金星 Polar oval の全体構造

武藤 圭史朗(東大理), 今村 剛(ISAS/JAXA)

1. はじめに

金星は太陽系の惑星の中で地球よりひとつ内側にある惑星であり、太陽系内で大きさ、 密度ともに地球によく似た惑星である。しかし、地球と異なり地表気温は 700K、大気 圧は 90 気圧と地球と大きく異なっている。他にも金星の特徴としてあげられるものに スーパーローテーションがある。過去の Pioneer Venus などのデータより金星にはスー パーローテーションと呼ばれる東風が恒常的に吹いていることがわかっている。金星の 自転周期が 243 日であるのに対しスーパーローテーションの周期は 4 日程度と大きく 値が離れている。この原因に関しては未だに解明されていない。

図1は右が Messenger による金星の可視光写真、左が Pioneer Venus による紫外光 写真である。可視光の写真を見ると表面に濃淡がなく、特徴的な構造が確認しにくい。 これは高度 50~70km の範囲に濃硫酸で出来た雲が存在し、この雲が金星全体を常に覆 っているためである。しかし、紫外光で金星を見ると縞模様が見える。これは未知の紫 外吸収物質のせいである。



図 1 金星の紫外光及び可視光領域での画像。紫外画像は Rossow et al. (1680)を改変。可 視画像は NASA ホームページより。

このように金星は紫外では様々な構造が確認できるが、可視では確認できない。これ により、金星の雲についての研究は紫外光を利用したものが主であり、エネルギー収支 に大きな影響を持つ可視光を利用した研究はあまりない。今回はこの可視光領域での金 星の雲の構造に注目して行った。

先ほど述べたように、金星は可視光ではほとんど濃淡が無いが、図2の赤い丸で囲った部分のように極域に Polar oval と呼ばれる半円状の構造が確認できる。これは紫外 光写真でも確認できる。しかし、この構造は夜側も含めた全体形状や時間変化に関して は今まで調べられておらずそのメカニズムは不明となっている。今回はこの Polar oval に注目して解析を行った。



図 2 金星の極域に見られる Polar oval の画像(Titov et al. 2012)



図 3 Venus Express の軌道 (Titov et al. 2012)

今回は Venus Express に登載されている VMC と いうカメラによって得られたデータセットを元に解 析を行った。実際に解析に使用したのは生データで はなく、金星探査機「あかつき」のデータ処理シス テムを利用して生データに緯度経度情報を与え金星 表面にマッピングした L3 データである。VMC は紫 外、可視、近赤外の波長で計測を行っているが、今 回解析に使用したのは主に波長 365nm の紫外と波 長 513nm の可視で得られたデータである。

Venus Express は図3のような北極で金星に近づ き、南極で遠ざかるような極軌道を24時間周期で周 回している。そのため、一番視野角が大きくなるの が金星の南極の上にいる時であり、今回の解析では 主に探査機が南極の上にいる時に得られたデータを 利用して解析を行った。

VMCのL3データはNetCDFの形式であるため、

Ruby を学び、Ruby で動く GPhys パッケージを使用して解析を行った。また、Panoply というソフトを使用して NetCDF データより金星の雲画像を作成した。

VMC は Venus Express の軌道の関係上連続してデータが取得できず、観測データが 存在しない期間というものが数十日単位で存在するが、今回は 2007/09/02~2013/09/09

2. 解析手法

の期間に取得したデータを解析した。また太陽光の入射角の違いに伴う明るさの違いを 金星の雲がランバート面であると仮定して補正を施したデータを用いた。

3. Polar oval の形状の復元

・東西移流速度の決定

VMC のデータは機械的なノイズが混じってしまっており雲の構造が読み取りにくか ったため数枚を重ねあわせ1軌道あたり1枚の画像に結合することを試みた。金星の雲 はスーパーローテーションに乗って回転しているためまずはスーパーローテーション の回転周期を求めることにした。

具体的な方法としては図4のような Polar oval の構造が特にはっきりと見えている 軌道を選び、赤で囲った範囲のデータを切り出してならべ、ホフメラー図(図4右側)を 作成した。なお右側の図は得られたデータを南極直上からの視点でプロットしたもので ある。スーパーローテーションの周期は左側の図の赤線の傾きから求めることができる。 これより、スーパーローテーションの周期を 3.5 日と求めた。この周期は紫外画像を用 いて雲の模様の追跡により極域の風速を求めた先行研究(Limaye et al. 2007)とも整合 的である(図 5)。



図 4 スーパーローテーションの周期を求めるのに使用したホフメラー図及びその範囲



図 5 紫外での雲画像追跡による大気の回転周期 (Limaye et al. 2007)

更に今回求めた回転周期の値の妥当性を確認するため紫外画像を3.5日周期だと仮定 し経度方向にずらし、4軌道貼りあわせてモザイクを作成した。図6を見ると矢印付近 で日をまたいで模様が繋がっている事がわかる。4軌道の最初と最後の画像ではあまり 模様が繋がっていないがこれはこの2つの軌道間が3日離れており、この間に模様が変 化したためだと思われる。



図 6 紫外画像のモザイク画

これによりスーパーローテーションの周期は3.5日と確認できたので東西移流による 経度のズレを補正して軌道毎に複数の画像を重ねあわせ各軌道1枚の画像にし、ノイズ の低減を行った。

・紫外と可視の模様の対応関係

まず、可視と紫外の模様の対応関係について見てみることにした。下の画像はその一 例である。基本的には可視画像では Oval 以外の構造は存在しないが、紫外画像では様々 な構造が存在していることがわかる。ここで、図7の、赤丸で囲った部分に注目すると、 可視画像では Oval のみが背景に対して暗くなっているのに対し紫外画像では Oval そ のものは確認できない。しかし、紫外画像でも Oval の内側に対応する部分が明るくな っており、可視、紫外ともに環状構造が存在していることがわかる。



図 7 同時刻の極域の可視と紫外の画像

・全体構造の復元

また、回転周期を3.5日と仮定して経度方向にずらし、4軌道連続で横に並べたのが 図8、図9である。これを見ると軌道番号1844~1847の期間では中心がくびれたよう な鉄アレイ型(図10左側)、軌道番号1812~1815の方は歪んだ卵型(図10右側)の構造が 見て取れる。このようにOvalの形は一定ではなく時期によって変化するということが わかった。



図 8連続した4日間の画像(軌道番号1844~1847)



図 10 推測される Polar oval の全体図

次に Oval 部分でどの程度輝度が減少しているかを調べた。軌道 1840 と 1842 の 2 つの軌道について図 11 のように緯度 70 度の緯度円にそって輝度を取り出しその最大 値で規格化を行った。Oval での反射率の落ち込みは可視光では 10%ほどで紫外光では 20%ほどであるということがわかる。



図 11 紫外及び可視の Polar oval を横切る緯度円に沿った輝度分布

更に、可視画像で極域以外で暗くなっている部分が見られたのでこれについても調べた。図 12 のようにある経度で輝度を取り出し、先ほどと同様にして規格化して反射率の低下を見た。このグラフを見ると極域で見られる構造と同程度の反射率の低下が最大で南緯 45 度付近まで広がっている事がわかる。また、このような中緯度帯での反射率の低下は多くの場合螺旋上であることも分かった。このような構造が確認できたのは全軌道の1割以下であり、発見出来た螺旋構造は Oval と同程度の反射率の低下であった。同程度の反射率の低下である理由としては、Oval よりも反射率の低下が少なかった場合ノイズに埋もれてしまい見つけられなかったためであると思われる。



4. Oval の時間変化

Ovalの形状変化を見るにあたり、ランバート面を仮定した輝度補正により入射角依存性を除いた画像であっても画像の端が暗くなってしまっているので、画像の端からの距離に応じて補正を行った。南緯 60 度までの輝度をとり、最小2 乗法を用いて1次近似を行い元の値との差を取った。



また、ovalの全体構造を復元するときにはノイズの削減のために何枚か重ね合わせ を行ったが、今回は重ね合わせによる端のデータの欠落を避けるため画像の重ね合わせ は行わなかった。



・ovalの時間変化抽出のための形状パラメータ

図 14 Oval の形状パラメータの抽出

Ovalの時間変化を見るために、存 在が確認できる範囲で極からovalま での距離の最大値(図 14のr_{max})と最 小値(図 14のr_{min})を目視により抽出し た。r_{max}もr_{min}もそれぞれOval全体 の最大値や最小値に一致するとは限 らないが、Ovalが 3.5 日周期で周回し ており4日間の連続したデータには必 ず最大値や最小値が含まれると考え られることから、長期変動を追跡する 上では問題がない。実際、この後見る ようにr_{max}やr_{min}の誤差は数日以下の 時間スケールでの変動幅から 1~2 度

程度と見積もられるが、それに対して数十日以上の時間スケールでの時間変化は20度

程度ある。なお、oval には数度の幅があるが今回は極に近い内側の値を用いて解析を 行った。

・oval の時間変化

図 15 は先ほど抽出した**r**_{min} - **r**_{max}を並べたものである。また、緑色の線は7 点移動 平均をプロットしたものであり、これを見ると数百日程度の時間スケールの変動が存在 し、その変動周期も時間変動していることが見て取れる。



図 15 r_{max} - r_{min}の時間変化

・周波数スペクトルの時間変化

図 16、17、18 はそれぞれ 500 日ごとにr_{min} – r_{max}、r_{min}、r_{max}の変化を Lomb-Scargle 法を用いて周波数解析を行い、得られたスペクトルを観測時期の関数としてプロットしたものである。周波数解析は 50 日ずつずらして行い、解析区間の最小の軌道番号を代表として横軸に取ってプロットしてある。図中の黒線で囲まれた区間が統計的に有意な範囲である。

これを見ると変動の周期は時期によって変化している事がわかる。また、初めの頃は r_{min}の影響が大きく、後半になるにつれて徐々にr_{max}の影響が強くなってきていること がわかる。また、r_{max}、r_{min}互いの変動の周期に強い相関はなさそうである。またどの 図を見ても金星の1年(およそ225日)に同期しているわけではなさそうである。





図 16 r_{min} - r_{max}の周波数スペクトルの時間変化

図 17 rminの周波数スペクトルの時間変化



図 18 r_{max}の周波数スペクトルの時間変化

5. まとめ及び考察

今回の解析では金星大気のスーパーローテーションによる東西移流を利用すること のより Polar oval の夜側も含めた全体構造を復元することに成功した。これにより復 元された構造は形状、大きさともに今まで Pioneer Venus や Venus Express の赤外分 光撮像により観測されてきた極域にある輝度温度が高い構造とよく似ており(Piccioni et al. 2007)、同じ構造が観測されている可能性が高いと言える。また、赤外で観測され てきた構造はハドレー循環によって赤道域から極域に角運動量が運ばれてきて極域で 極渦を形成し、その極渦の力学的不安定により形成されていると考えられているが、可 視、紫外で確認されている構造も同様のものである可能性がある。

また、ovalの形状には数百日程度の時間変化が見られその変動周期は時間変化していた。今回の解析によると oval の形状の変化は金星の1年と同期しているわけではなく、自励的な現象であることが伺える。



図 19 可視画像のモザイク画と赤外での輝度温度分布輝度温度分布の画像は Piccioni et al. (2007)より

参考文献

- Rossow, W. B., A. D. Del Genio, S. S. Limaye, L. D. Travis, and P. H. Stone (1980), Cloud morphology and motions from Pioneer Venus images, J. Geophys. Res., 85, 8107– 8128.
- Dmitrij V. Titova, Wojciech J. Markiewicza, Nikolay I. Ignatieva, Li Songa, Sanjay S. Limayed, Agustin Sanchez-Lavegae, Jonas Hesemanna, Miguel Almeidaf, Thomas Roatschg, Klaus-Dieter Matzg, Frank Scholteng, David Crisph, Larry W. Espositoi, Stubbe F. Hviida, Ralf Jaumanng, Horst U. Kellera, Richard Moissla (2012), Morphology of the cloud tops as observed by the Venus Express Monitoring Camera, *Icarus*, 217,682-701.

Limaye, S. S. (2007), Venus atmospheric circulation: Known and unknown, J. Geophys.

Res., 112, E04S09.

- G. Piccioni, P. Drossart, A. Sanchez-Lavega, R. Hueso, F. W. Taylor, C. F. Wilson, D.
 Grassi, L. Zasova, M. Moriconi, A. Adriani, S. Lebonnois, A. Coradini, B. Bézard, F.
 Angrilli, G. Arnold, K. H. Baines, G. Bellucci, J. Benkhoff, J. P. Bibring, A. Blanco, M.
 I. Blecka, R. W. Carlson, A. Di Lellis, T. Encrenaz, S. Erard, S. Fonti, V. Formisano, T.
 Fouchet, R. Garcia, R. Haus, J. Helbert, N. I. Ignatiev, P. G. J. Irwin, Y. Langevin, M.
 A. Lopez-Valverde, D. Luz, L. Marinangeli, V. Orofino, A. V. Rodin, M. C. Roos-Serote,
 B. Saggin, D. M. Stam, D. Titov, G. Visconti, M. Zambelli & the VIRTIS-Venus
 Express Technical Team (2007), South-polar features on Venus similar to those near
 the north pole, *Nature*, 450, 637-640.
- Scargle J. D. (1982), Studies in astronomical time series analysis. II –Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, *Astrophys. J.*, **263**, 835–853.